

# Электромеханические системы

УДК 62-83:621.313.3

## СХЕМЫ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, ВЫПОЛНЕННЫЕ ПО УСЛОВИЮ МИНИМУМА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

М.А. Григорьев, Н.Ю. Сидоренко, С.И. Кинас

Определена необходимость выбора оптимальной схемы силовых цепей электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения. Произведен расчет удельных весовых коэффициентов, представлены в зависимости от величин номинального тока линейные регрессионные зависимости удельных потерь в полупроводниковых преобразователях частоты. Выявлено, что с увеличением несущей частоты ШИМ улучшается выходная форма тока, но увеличиваются потери, поэтому необходимо в зависимости от решаемой задачи определенным образом выбирать несущую частоту. Для решения задачи оптимизации по критерию минимума электрических потерь построена регрессионная зависимость электрических потерь в преобразователе частоты от тока при частоте ШИМ-сигнала 0 Гц. Представлена поверхность критерия оптимизации в зависимости от номинального момента двигателя и числа фаз. В электроприводах с СРДНВ при малых мощностях критерий оптимизации получается самым плохим для многофазных схем. При увеличении мощности данная тенденция сохраняется, но становится незначительным различие оптимальных решений для трехфазной и многофазной схем. Это объясняется линейностью зависимости электрических потерь от тока.

*Ключевые слова:* синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения, удельные электрические потери.

Условия, при которых производится размещение силового оборудования, ограничены на определенного рода технологических объектах. К примеру, электроприводы буровых установок располагаются в контейнере с ограниченными условиями транспортирования размерами. Изначально главным электроприводом выступал привод постоянного тока [1]. Замена существующего электропривода приводом переменного тока привела к тому, что пришлось иным образом разрабатывать систему охлаждения. Это объясняется тем, что нагрев пространства вокруг преобразователя частоты, а также потери в них, выше.

С увеличением числа фаз возрастают электрические потери и количество полупроводниковых элементов электрического преобразователя [2–4]. Но в то же время, массогабаритные показатели электромеханического преобразователя получаются наилучшими при  $f > 6$ . Отсюда определяется необходимость выбрать оптимальную схему силовых цепей электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения СРДНВ [6].

Критерием оптимизации может выступать функция следующего вида:

$$q_3 = \frac{\Delta P(X)}{M} = \frac{\Delta P(F_B^0, F_A^0, F^0, D_p^0/D_c, \alpha^0, f)}{M}.$$

Здесь  $\Delta P$  – величина, которая пропорциональна суммарным электрическим потерям,  $F_B^0, F_A^0, F^0, D_p^0/D_c, \alpha^0$  не изменяются, а  $f$  – меняется опре-

деленным образом в пределах допустимых значений  $F = \{f : 0 \leq f \leq \infty\}$ ;  $M$  – значение номинального электромагнитного момента двигателя.

Чтобы произвести расчет удельных весовых коэффициентов, обратимся к рис. 1, на котором представлены в зависимости от величин номинального тока линейные регрессионные зависимости удельных потерь в полупроводниковых преобразователях частоты [5, 7–9]. Статистическая обработка приведенных зависимостей представлена в табл. 1.

Для проведения статистической обработки данных была взята выборка объемом  $N = 31$ . Рассчитанный коэффициент распределения Стьюдента  $t$  не превышает критического значения [10–13]. После анализа имеющихся кривых показано, что абсолютные электрические потери определяются как классом преобразователя, так и производителем (см. рис. 1). Например, Control Techniques производит преобразователи различного типа. И самый дорогостоящий преобразователь Unidrive SP выпускается с пониженными электрическими потерями в сравнении с решениями на базе SE [14]. Возможно, это достигается использованием полупроводниковых ключей с меньшим прямым падением напряжения.

На рис. 1 проходящие горизонтально регрессионные зависимости 2, 3, 4 говорят о том, что электрические потери в преобразователях пропорциональны току и могут аппроксимироваться линейными функциями.

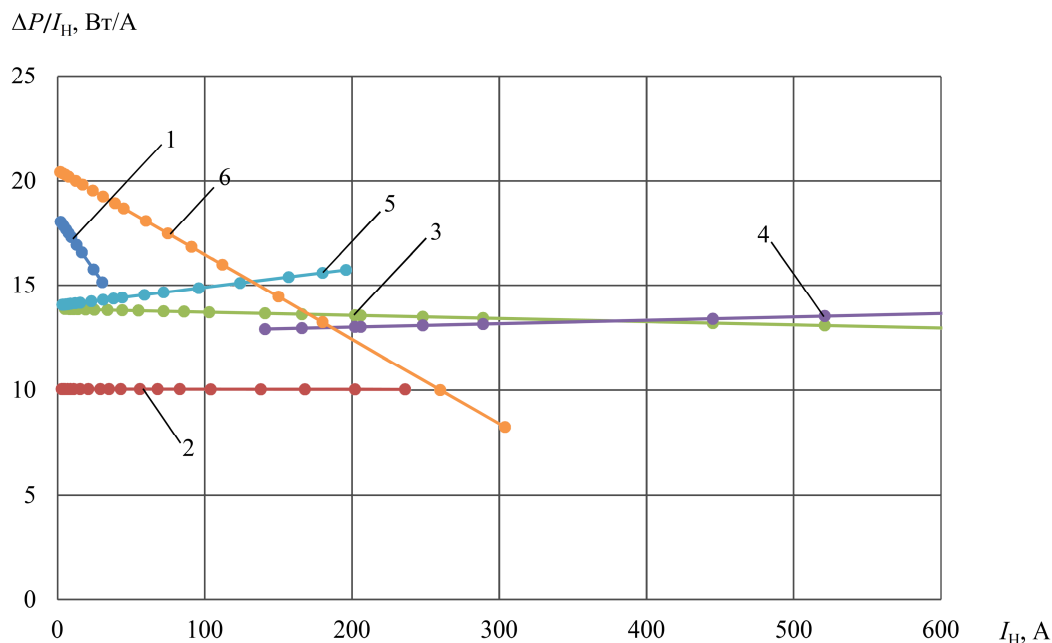


Рис. 1. Регрессионные зависимости, определяющие удельные потери в вентильных преобразователях: 1 – SE Control Techniques, 2 – SP Control Techniques, 3 – ACS800-01 ABB, 4 – ACS880 ABB, 5 – ACS550-01 ABB, 6 – 3G3RVA Omron

Таблица 1

Статистическая обработка регрессионных зависимостей удельных потерь в зависимости от номинального тока

№	Параметр				
	$I_H, A$	$P_{ЭМП}/I_H, Вт/А$	$P_{РЕГ}/I_H, Вт/А$	$d$	$d^2$
1	5	15,62	14,45	1,17	1,36
2	11	13,07	14,24	-1,17	1,36
3	20	15,14	13,96	1,19	1,4
4	25	15,14	13,81	1,33	1,77
...	...	...	...	...	...
31	1000	12,24	12,13	0,11	0,012
$s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - (\sum d)^2}{n-1}}$		0,73			
$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$		0,001			
$t_{КРИТ}$		2,042			

Известна зависимость электрических потерь преобразователя от значения несущей частоты. Увеличением несущей частоты ШИМ улучшается выходная форма тока, но увеличиваются потери [16–18]. Поэтому необходимо в зависимости от решаемой задачи определенным образом выбирать несущую частоту.

Если критерием оптимизации выступает критерий минимума электрических потерь, необходимо определить зависимость величины потерь от несущей частоты ШИМ [15]. Для решения данной

задачи построена регрессионная зависимость электрических потерь в преобразователе частоты от тока при частоте ШИМ-сигнала 0 Гц.

Статистическая оценка результатов приведена в табл. 2. Как видно из рис. 2, если установить несущую частоту минимального значения, потери могут быть снижены приблизительно в 1,5 раза.

Задача определения оптимума величины  $q_3$  вполне может решаться как задача одномерного поиска численными методами. На рис. 3 представлена поверхность критерия  $q_3$  в зависимости от

Таблица 2

Оценка потерь в преобразователях с учетом работы при различной частоте ШИМ

$f$ , кГц	$t_{\text{ЭКСП}}$	$t_{\text{РЕГ}}$	$d$	$E_1 = d - t \frac{s_d}{\sqrt{n}}$	$E_2 = d + t \frac{s_d}{\sqrt{n}}$
1	59	58,87	0,13	-0,04	0,31
2	62	62,28	0,28	0,1	0,45
4	69	68,8	0,2	0,02	0,38
8	82	82,1	0,09	-0,09	0,26
12	96	95,9	0,03	-0,15	0,21
16	107	107,01	0,01	-0,16	0,19
$s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}}$			0,17		
$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$			0,03		
$t_{\text{КРИТ}}$			2,571		

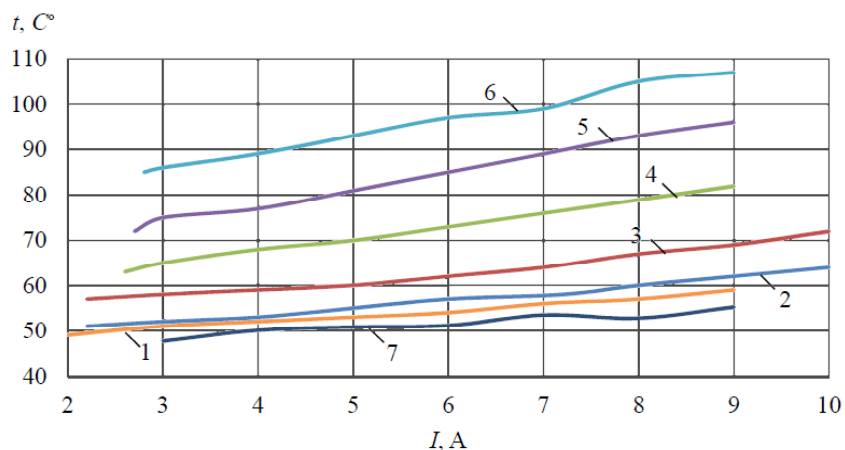


Рис. 2. Потери в полупроводниковых преобразователях при различной несущей частоте:  
1 – 1 кГц, 2 – 2 кГц, 3 – 4 кГц, 4 – 8 кГц, 5 – 12 кГц, 6 – 16 кГц, 7 – 0 кГц

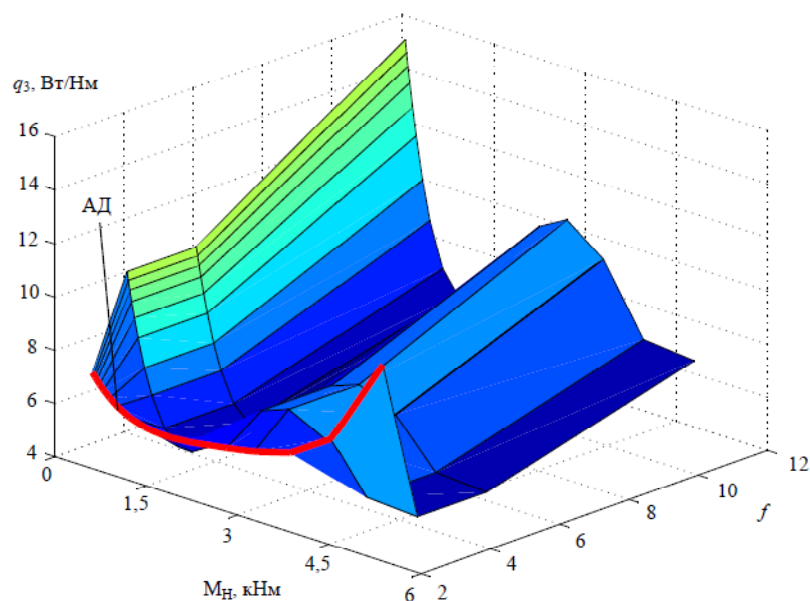


Рис. 3. Зависимость критерия  $q_3 = \Delta P(X)/M$  от момента и количества фаз  $f$

номинального момента двигателя и числа фаз [17, 19–21]. В электроприводах с СРДНВ при малых мощностях  $q_3$  получается самым плохим для многофазных схем. При увеличении мощности данная тенденция сохраняется, но становится незначительным различие оптимальных решений для трехфазной и многофазной схем [22]. Это объясняется линейностью зависимости электрических потерь от тока (см. рис. 1).

### Литература

1. Дудкин, М.М. Динамические спектральные характеристики развертывающих преобразователей с широтно-импульсной модуляцией / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович, О.Г. Брылина // *Практическая силовая электроника*. – 2012. – № 4. – С. 49–55.
2. Реверсивный тиристорный преобразователь для систем управления с питанием от сети с нестационарными параметрами / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // *Практическая силовая электроника*. – 2009. – № 34. – С. 35–41.
3. Интегрирующие развертывающие преобразователи с повышенной температурной стабильностью характеристик / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина, Н.А. Логинова // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2010. – № 10. – С. 38–43.
4. Качалов, А.В. Интегрирующие устройства синхронизации для систем импульснофазового управления вентильными преобразователями / А.В. Качалов, Л.И. Цытович, О.Г. Брылина // *Практическая силовая электроника*. – 2010. – № 37. – С. 42–51.
5. Цытович, Л.И. Развертывающие преобразователи для систем управления вентильными электроприводами и технологической автоматикой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Л.И. Цытович. – Уфа, 1996.
6. Журавлев, А.М. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / А.М. Журавлев, Е.В. Белоусов, Д.А. Сычев // *Фундаментальные проблемы технических наук: науч.-практ. конф.* – Уфа, 2014. – С. 59–63.
7. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / А.М. Журавлев, А.Е. Бычков, Е.В. Белоусов и др. // *Теоретические и практические аспекты развития современной науки: науч.-практ. конф.* – М., 2014. – С. 43–49.
8. Цытович, Л.И. Элементы информационной электроники систем управления вентильными преобразователями / Л.И. Цытович. – Челябинск: ЮУрГУ, 1999.
9. Адаптивная интервало-кодовая двоично-десятичная интегрирующая синхронизация систем управления силовыми вентильными преобразователями / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин // *Электротехника*. – 2013. – № 3. – С. 8–15.
10. Цытович, Л.И. Развертывающий операционный усилитель с автоматическим резервированием каналов передачи информации / Л.И. Цытович, В.А. Кожевников, А.В. Соколов // *Приборы и техника эксперимента*. – 1986. – № 3. – С. 119.
11. Цытович, Л.И. Многозонный развертывающий преобразователь с адаптируемой в функции неисправности активных компонентов структурой / Л.И. Цытович // *Приборы и техника эксперимента*. – 1988. – № 1. – С. 81.
12. Энергоэффективный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / А.М. Журавлев, Е.В. Белоусов, Д.А. Сычев, С.И. Кинас // *Технические науки – от теории к практике: науч.-практ. конф.* – Новосибирск, 2014. – С. 94–102.
13. О новом принципе интегрирующего аналого-цифрового преобразования с бестактовым поразрядным уравниванием / С.П. Лохов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2012. – № 37 (296). – С. 97–106.
14. Анализ динамики интегрирующего амплитудно-частотно-импульсного развертывающего преобразователя аналоговых сигналов в частоту импульсов / Л.И. Цытович, Р.Х. Гафитятуллин, Р.З. Хусаинов, М.М. Дудкин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2003. – № 3. – С. 36.
15. Пат. 2320071 Российская Федерация, МПК Н 02 М 1/08, Н 02 Р 1/16. Фазосдвигающее устройство / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин – № 2006135589/09; заявл. 27.10.2008; опубл. 20.11.2009, Бюл. № 32.
16. Цытович, Л.И. Развертывающий операционный усилитель с перестраиваемой полосой пропускания / Л.И. Цытович // *Приборы и техника эксперимента*. – 1979. – № 4. – С. 149.
17. Цытович, Л.И. Многозонные интегрирующие системы управления каскадами «вентильный преобразователь – исполнительный механизм» для объектов с параллельными каналами регулирования / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина // *Практическая силовая электроника*. – 2009. – № 36. – С. 23–30.
18. Пат. 2251206 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 5/46, Н 02 Р 1/54. Система управления группой асинхронных электроприводов водяных насосов / Л.И. Цытович, Р.Х. Гафитятуллин, В.И. Тазетдинов, С.И. Шкаликов, И.И. Вольберг, А.Ю. Мыльников, В.В. Шахматов, А.А. Габорик, С.И. Скляров. – № 2003114987/09; заявл. 20.05.2003; опубл. 27.04.2005, Бюл. № 12.
19. Пат. 2408969 Российская Федерация, МПК Н 02 М 5/293. Многозонный частотно-широотно-импульсный регулятор переменного напряжения / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, А.В. Качалов. – № 2009148024/07; заявл. 23.12.2009; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

20. Маурер, В.Г. Цифровой измеритель амплитудно-фазочастотных характеристик «ВЕКТОР2М» / В.Г. Маурер, Л.И. Цытович // Приборы и техника эксперимента. – 1990. – № 5. – С. 6.

21. Система непрерывного контроля сопротивления изоляции электротехнических изделий в процессе их термической сушки / Л.И. Цытович,

Р.М. Рахматулин, О.Г. Брылина и др. // Промышленная энергетика. – 2013. – № 1. – С. 24–28.

22. Цытович Л.И. Развертывающие преобразователи с автоматическим диагностированием и резервированием каналов передачи информации / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2004. – № 5. – С. 55.

**Григорьев Максим Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 9191236713@mail.ru.

**Сидоренко Надежда Юрьевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sidorenkoy@susu.ac.ru.

**Кинас Станислав Игоревич**, аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 9191236713@mail.ru.

Поступила в редакцию 16 июня 2014 г.

---

**Bulletin of the South Ural State University**  
**Series “Power Engineering”**  
**2014, vol. 14, no. 3, pp. 55–60**

---

## POWER CIRCUIT DIAGRAMS IN THE AC ELECTRIC DRIVES MADE ON THE CONDITION OF ELECTRICAL LOSSES MINIMUM

**M.A. Grigorev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, 9191236713@mail.ru,

**N.Y. Sidorenko**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, sidorenkoy@susu.ac.ru,

**S.I. Kinass**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, 9191236713@mail.ru

The paper identifies the necessity of optimal power circuit diagram selection for electric drive with field regulated reluctance machine. The authors present computation of specific weight coefficients and give, in relation to the rated current, linear regressional dependences of specific losses in semiconductor frequency converters. It is found that increasing PWM carrier frequency improves output current waveform, but increases losses, so it is needed to choose the carrier frequency in a certain way according to problem. To solve the optimization problem considering minimal electrical losses the authors constructed regressional dependence of electrical losses in the frequency converter on current at a frequency of PWM signal of 0 Hz. The paper presents optimization criterion surface depending on the rated motor torque and the number of phases. The optimization criterion in electric drives with FRRM at low power is the worst for multiphase circuits. At power increase this trend persists, but difference between optimal solutions for three-phase and poly-phase circuits becomes insignificant. This is explained by linear dependence of electrical losses on the current.

*Keywords:* field regulated reluctance machine, unit electrical losses.

### References

1. Dudkin M.M., Tsytoich L.I., Brylina O.G. [Dynamic Spectral Performances of Sweep Converters with Pulse-Width Modulation]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical Power Electronics], 2012, no. 4 (48), pp. 49–55. (in Russ.)

2. Tsytoich L.I. [Reversible Thyristor converter for Control Systems with Mains with Non-Stationary Parameters]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical Power Electronics], 2009, no. 34, pp. 35–41. (in Russ.)

3. Tsytoich L.I., Dudkin M.M., Tereshchina O.G., Loginova N.A. [Integrating Sweep Converters with Heightened Temperature Stability of Performances]. *Pribory i sistemy. Ypravlenie, control, diagnostika* [Devices and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics], 2010, no. 10, pp. 38–43. (in Russ.)

4. Kachalov A.V., Tsytoich L.I., Brylina O.G. [Integrating Device Synchronization Pulse Phase Control System of the Converter]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical Power Electronics], 2010, no. 37, pp. 42–51. (in Russ.)
5. Tsytoich L.I. *Razvertyvayushchie preobrazovateli dlya sistem upravleniya ventil'nyimi elektroprivodami i tekhnologicheskoy avtomatiki* [Deploying Converters for Control Systems and Electric Gating Process Automation. Abstract of doct. diss.]. Ufa, 1996.
6. Zhuravlev A.M., Belousov E.V., Sychev D.A. [A Mathematical Model of the Electric Drive with Field Regulated Reluctance Machine]. *Fundamentalnye problemy tekhnicheskikh nauk* [Fundamental Problems of Technical Sciences], 2014, pp. 59–63. (in Russ.)
7. Zhuravlev A.M., Bychkov A.E., Belousov E.V., Sychev D.A., Kinas S.I. [A Mathematical Model of the Electric Drive with Field Regulated Reluctance Machine]. *Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty razvitiya sovremennoy nauki* [Theoretical and Practical Aspects of Modern Science], 2014, pp. 43–49. (in Russ.)
8. Tsytoich L.I. *Elementy informatsionnoy elektroniki sistem upravleniya ventil'nyimi preobrazovatelyami* [Electronics Elements of Information Management Systems of the Converter]. Chelyabinsk, South Ural State University, 1999.
9. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M. [Adaptive Interval-Code Binary-Decimal Integrating Synchronization of Control Systems of Power Valve Converters]. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 3, pp. 8–15. (in Russ.)
10. Tsytoich L.I., Kozhevnikov V.A., Sokolov A.V. [Deploys an Operational Amplifier with Automatic Backup Communication Channels]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 1986, no. 3, p. 119. (in Russ.)
11. Tsytoich L.I. [Multiband Scanning Converter with Adaptive Function Failure of the Active Components of the Structure]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 1988, no. 1, p. 81. (in Russ.)
12. Zhuravlev A.M., Belousov E.V., Sychev D.A., Kinas S.I. [Energy-Efficient Electric Drive with Field Regulated Reluctance Machine]. *Tekhnicheskiye nauki – ot teorii k praktike* [Engineering – from Theory to Practice], 2014, pp. 94–102. (in Russ.)
13. Lokhov S.P., Tsytoich L.I., Dudkin M.M., Brylina O.G., Rakhmatulin R.M. [About New Principle of Integrating Analog-to-Digital Conversion with Tactless Bit-by-Bit Equilibration]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2012, no. 37 (296), pp. 97–106. (in Russ.)
14. Tsytoich L.I., Gafityatullin R.Kh., Khusainov R.Z., Dudkin M.M. [Analysis of the Dynamics of Integrating the Amplitude of the Scanning Pulse-Frequency Converter of Analog Signals in Pulse Frequency]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2003, no. 3, p. 36. (in Russ.)
15. Tsytoich L.I., Dudkin M.M. *Fazosdviyayushchee ustroystvo* [Phase Shifter]. Patent RF, no. 2320071, 2009.
16. Tsytoich L.I. [Deploys an operational amplifier with a tunable bandwidth]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 1979, no. 4, p. 149. (in Russ.)
17. Tsytoich L.I., Tereshchina O.G. [Integrating Multi-Zone Control System Cascades “Converter Valve – Actuator” for Objects with Parallel Channel Regulation]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical Power Electronics], 2009, no. 36, pp. 23–30. (in Russ.)
18. Tsytoich L.I., Gafityatullin R.Kh., Tazetdinov V.I., Shkalikov S.I., Volberg I.I., Mylnikov A.Yu., Shakhmatov V.V., Gaborik A.A., Sklyarov S.I. *Sistema upravleniya gruppoy asinkhronnykh elektroprivodov vodnykh nasosov* [Control System for Group of Water-Pump Induction-Motor Drives]. Patent RF, no. 2251206, 2005.
19. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Kachalov A.V. *Mnogozonnyy chastotno-shirotno-impul'snyy regulyator peremennogo napryazheniya* [Multipoint Frequency-Pulse Width Variable Voltage Regulator]. Patent RF, no. 2408969, 2011.
20. Maurer V.G., Tsytoich L.I. Digital [Meter amplitude-phase-frequency characteristics “VEKTOR2M”]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 1990, no. 5, p. 6. (in Russ.)
21. Tsytoich L.I., Rakhmatulin R.M., Brylina O.G., Dudkin M.M., Mylnikov A.Yu., Tyugayev V.A., Tyugayev A.V. [The system of continuous monitoring the insulation resistance of electrical products in the course of their thermal drying]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2013, no. 1, pp. 24–28. (in Russ.)
22. Tsytoich L.I., Tereshchina O.G. [Deploying converters with automatic diagnosis and redundant communication channels]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2004, no.5, p. 55. (in Russ.)

Received 16 June 2014